

SUMBER, JALUR TRANSPOR, DAN DAMPAK EKOLOGIS PENCEMARAN LOGAM BERAT DI EKOSISTEM PERAIRAN: TINJAUAN NARATIF

SOURCES, TRANSPORT PATHWAYS, AND ECOLOGICAL IMPACTS OF HEAVY METAL POLLUTION IN AQUATIC ECOSYSTEMS: A NARRATIVE REVIEW

Randi Syafutra^{1,2,3*}

¹Program Studi Doktor Ilmu Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, IPB University, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

²Program Studi Konservasi Sumber Daya Alam, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Bangka Belitung, Pangkalpinang, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

³TERRA Indonesia, Pangkalpinang, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

*Email Korespondensi: randi.syafutra@unmuhbabel.ac.id

Abstrak

Pencemaran logam berat akibat aktivitas manusia di ekosistem perairan merupakan masalah lingkungan persisten yang memengaruhi keseimbangan ekologis. Tinjauan naratif ini bertujuan menyintesis literatur ilmiah terkait sumber emisi, jalur perpindahan, dan dampak ekotoksikologi dari logam berat. Penelitian ini menggunakan metode tinjauan naratif berbasis pencarian literatur daring dengan fokus lokasi kajian pada berbagai ekosistem perairan secara global, yang menelaah 20 artikel ulasan terbitan tahun 2015 hingga 2026. Hasil telaah menunjukkan bahwa logam berat dari limbah industri dan limpasan pertanian mengendap di kompartemen sedimen, yang kemudian memicu proses bioakumulasi pada organisme akuatik serta berisiko masuk ke dalam rantai makanan manusia. Sebagai simpulan, pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika polutan ini dipandang esensial untuk merancang regulasi dan strategi remediasi demi memulihkan kualitas sumber daya perairan di masa depan.

Kata Kunci: *Bioakumulasi, Ekosistem Perairan, Ekotoksikologi, Logam Berat, Sedimen.*

Abstract

Persistent heavy metal pollution due to human activities in aquatic ecosystems is an environmental issue affecting ecological balance. This narrative review aims to synthesize scientific literature regarding emission sources, transport pathways, and ecotoxicological impacts of heavy metals. This study employed a narrative review method based on an online literature search focusing on global aquatic ecosystems, analyzing 20 review articles published between 2015 and 2026. The review indicates that heavy metals from industrial waste and agricultural runoff settle in the sediment compartment, which then triggers bioaccumulation in aquatic organisms and poses exposure risks to human food chains. In conclusion, a comprehensive understanding of these pollutant dynamics is deemed essential for designing regulations and remediation strategies to sustainably restore the quality of aquatic resources in the future.

Keywords: *Aquatic Ecosystems, Bioaccumulation, Ecotoxicology, Heavy Metals, Sediments.*

Genesis Naskah (Diterima: Mei 2026, Disetujui: Juni 2026, Diterbitkan: Juli 2026)

PENDAHULUAN

Ekosistem perairan menghadapi tantangan lingkungan yang berkaitan dengan pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan kegiatan industri. Salah satu bentuk tekanan lingkungan yang persisten dan memerlukan perhatian adalah pencemaran bahan kimia anorganik, khususnya kelompok elemen logam berat. Logam berat tidak dapat didegradasi atau dipecah menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui proses biologi, fisika, maupun fotokimia yang wajar terjadi di lingkungan perairan (Ali *et*

al., 2019). Aktivitas industri yang meningkat tampaknya menambah jumlah logam berat yang masuk ke perairan, yang berpotensi memengaruhi kualitas air dan jaring-jaring makanan di dalamnya (Ding *et al.*, 2022).

Logam berat didefinisikan sebagai elemen dengan berat atom yang tinggi. Beberapa di antaranya, seperti tembaga (Cu) dan seng (Zn), diperlukan oleh organisme dalam jumlah sedikit untuk proses biologis (Galasso *et al.*, 2025). Namun, paparan dalam konsentrasi yang berlebih berpotensi membahayakan kehidupan akuatik. Di sisi lain, logam non-esensial seperti

timbal (Pb), merkuri (Hg), dan kadmium (Cd) tidak memiliki fungsi biologis yang diketahui dan terindikasi bersifat toksik (Kumar *et al.*, 2024).

Mekanisme distribusi dan akumulasi logam berat di lingkungan akuatik bergantung pada kondisi fisik dan kimia perairan. Salah satu dinamika yang krusial adalah bahwa logam berat cenderung terikat pada partikel air dan perlahan mengendap di kompartemen sedimen (Hossain *et al.*, 2024). Sedimen ini pada akhirnya berfungsi sebagai tempat berkumpulnya polutan yang memiliki kemungkinan untuk kembali masuk ke kolom air jika terjadi fluktuasi parameter lingkungan.

Di Indonesia, fenomena kontaminasi perairan ini relevan untuk dikaji lebih jauh, mengingat sejumlah penelitian mendokumentasikan paparan logam di wilayah muara dan kawasan pesisir (Diansyah *et al.*, 2025; Haryati *et al.*, 2026). Sebagai contoh pemantauan terkini, sedimen di sekitar ekosistem mangrove Angke Kapuk yang terletak di Teluk Jakarta terindikasi mengakumulasi logam berat secara progresif akibat padatnya aktivitas kapal maritim dan perluasan reklamasi (Andriani *et al.*, 2025). Mempertimbangkan potensi dampak lintas sektoral tersebut, artikel ini disusun dengan tujuan untuk merangkum data literatur mengenai sumber emisi, jalur perpindahan, dan derajat efek toksikologis pencemaran logam berat di perairan.

METODE PENELITIAN

Pendekatan dan Desain Penelitian

Artikel ini disusun menggunakan tinjauan naratif untuk mengumpulkan dan menyintesis temuan dari publikasi ilmiah, sebuah pendekatan yang lazim dan relevan untuk memetakan distribusi polusi di ekosistem perairan secara komprehensif (Afifudin *et al.*, 2024). Tinjauan naratif dipilih karena metode ini memfasilitasi penyusunan ringkasan dari topik yang memiliki cakupan luas dan merangkum interaksi antara kimia lingkungan, hidrologi, serta ekotoksikologi. Mengingat sifat penelitian ini, lokasi kajian tidak dibatasi pada satu wilayah fisik, melainkan mencakup ekosistem perairan secara global.

Strategi Pencarian Literatur

Identifikasi literatur dilaksanakan melalui penelusuran pada basis data akademik *Google Scholar*. Waktu penelitian literatur difokuskan pada artikel-artikel yang diterbitkan pada tahun

2015 hingga 2026. Strategi pencarian diformulasikan menggunakan operator logika *Boolean* dengan kata kunci ("*hazardous waste*" OR "*toxic waste*" OR "*chemical pollutant*" OR "*heavy metal*") AND ("*aquatic ecosystem*" OR "*water body*" OR "*river*" OR "*marine*" OR "*estuary*") AND ("*source*" OR "*origin*" OR "*pathway*" OR "*transport*" OR "*runoff*") AND ("*ecological impact*" OR "*ecotoxicity*" OR "*aquatic toxicity*" OR "*environmental effect*").

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Penyaringan literatur dilakukan secara ketat berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi berikut:

1. Bahasa: Literatur dipublikasikan dalam bahasa Inggris.
2. Indeksasi: Artikel jurnal terindeks dalam basis data *Scopus*.
3. Tipologi Dokumen: Artikel berjenis ulasan (*review article*).
4. Kesesuaian Tema: Substansi utama berfokus pada sumber emisi, mekanisme transpor, dan dampak ekologis dari pencemaran logam berat.
5. Kebaruan Data: Rentang waktu publikasi dibatasi pada tahun 2015 hingga 2026.
6. Aksesibilitas: Naskah artikel tersedia secara utuh (*full-text availability*) untuk dianalisis.

Ekstraksi dan Analisis Data

Setelah proses seleksi awal, sebanyak 20 artikel ulasan dievaluasi kelayakannya dan dipilih untuk diekstraksi. Informasi dari setiap literatur diekstraksi ke dalam matriks kategorikal yang membedakan data menjadi profil sumber pencemaran, rute penyebaran abiotik, dan dokumentasi tingkat toksisitas pada organisme perairan guna menyusun bagian hasil dan pembahasan secara terstruktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Literatur Utama

Dari 20 artikel yang dikaji, informasi mengenai pencemaran logam berat dapat dibagi menjadi tiga bagian pokok: sumber, cara berpindah, dan dampaknya pada organisme perairan. Fokus utama dari masing-masing literatur ekstraksi dapat dilihat pada Tabel 1.

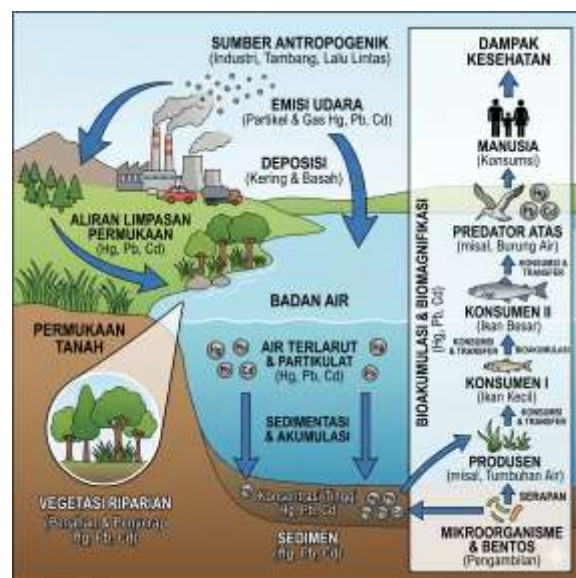
Tabel 1. Fokus kajian 20 artikel ulasan

Penulis (tahun)	Fokus utama
Hossain <i>et al.</i> (2024)	Distribusi logam di sedimen dan biota sungai.
Khushbu <i>et al.</i> (2022)	Dampak pada ikan dan kesehatan manusia.
Tarfeen <i>et al.</i> (2022)	Penggunaan mikroba untuk mengurangi polusi.
Palmer & Herat (2021)	Peran mikroplastik membawa logam berat.
Ouma <i>et al.</i> (2022)	Risiko dari area pertambangan terhadap sungai.
Ali <i>et al.</i> (2019)	Daya tahan dan penumpukan logam di lingkungan.
Gavas <i>et al.</i> (2026)	Penelitian logam berat pada kerang (bivalvia).
El-Sharkawy <i>et al.</i> (2025)	Dampak dan penanganan polusi di wilayah pesisir.
Brady <i>et al.</i> (2015)	Cara mengukur tingkat polusi di sedimen muara.
Mehreen & Liu (2026)	Masuknya logam ke sedimen dan efeknya pada cacing laut.
Macleod & Coughanowr (2019)	Sejarah dan penanganan polusi di Muara Derwent.
Sodhi <i>et al.</i> (2022)	Efek racun dan cara baru membersihkan logam.
Galasso <i>et al.</i> (2025)	Kaitan logam berat dengan krisis keanekaragaman hayati masa lalu.
Joshi <i>et al.</i> (2023)	Penggunaan bakteri akar tanaman untuk mengurangi racun logam.
Derrick <i>et al.</i> (2025)	Masalah polusi logam pada tambak udang.
Ra <i>et al.</i> (2023)	Bagaimana logam menumpuk di bagian tubuh udang yang berbeda.
Zhang <i>et al.</i> (2025)	Perpindahan logam dari tanah ke udara.
Ding <i>et al.</i> (2022)	Efek racun logam pada makhluk hidup dari mikroba hingga manusia.
Kumar <i>et al.</i> (2024)	Penggunaan tanaman untuk mengatasi polusi logam (fitoremediasi).
Bakshe & Jugade (2021)	Penyebaran logam dan pengaruh keasaman (pH) di sedimen sungai.

Logam berat di perairan berasal dari sumber alami dan aktivitas manusia (Brady *et al.*, 2015). Sumber alami termasuk pelapukan batuan dan letusan gunung berapi (Khushbu *et al.*, 2022). Namun, aktivitas manusia yang lebih banyak menyebabkan peningkatan jumlah logam berat di lingkungan. Kegiatan pertambangan sering kali menghasilkan limbah yang terbawa ke sungai (Ouma *et al.*, 2022). Industri manufaktur dan tekstil juga mengeluarkan limbah yang mengandung logam seperti Pb, Cd, dan Hg. Di bidang pertanian, penggunaan pupuk dan pestisida berbahan kimia dapat menyumbang logam berat yang terbawa air hujan ke perairan (El-Sharkawy *et al.*, 2025). Kegiatan di pelabuhan dan penggunaan cat kapal juga turut melepaskan logam ke lingkungan laut (Macleod & Coughanowr, 2019).

Jalur Transpor ke Lingkungan Perairan

Logam berat berpindah ke perairan melalui beberapa cara (Gambar 1). Air hujan yang mengalir di permukaan tanah (limpasan) dapat membawa partikel logam dari area industri dan pertanian ke sungai (Tarfeen *et al.*, 2022). Polusi udara dari pabrik atau kendaraan bermotor juga membawa partikel logam yang kemudian jatuh ke air bersama hujan (Zhang *et al.*, 2025).



Gambar 1. Gambaran jalur perpindahan logam berat ke perairan, mulai dari udara, aliran limpasan permukaan, hingga mengendap di sedimen dan masuk ke rantai makanan (ilustrasi dibuat dengan teknologi Imagen dari Google)

Sumber Pencemaran Logam Berat

Di dalam air, logam berat bisa menempel pada mikroplastik, yang membuatnya lebih mudah tersebar ke tempat yang lebih jauh sebelum termakan oleh hewan air (Palmer & Herat, 2021). Pada akhirnya, sebagian besar logam berat akan mengendap di dasar air dan bercampur dengan sedimen (Hossain *et al.*, 2024). Sedimen ini menyimpan logam yang suatu saat bisa terlepas kembali ke air jika terjadi perubahan lingkungan (Bakshe & Jugade, 2021).

Dampak Ekologis pada Biota Perairan

Dampak logam berat bergantung pada jenis, jumlah, dan lamanya paparan. Logam di sedimen dapat diserap oleh hewan yang hidup di dasar perairan seperti kerang (Mehreen & Liu, 2026). Logam ini kemudian bisa berpindah ke hewan lain yang memakannya, dengan jumlah yang semakin meningkat di setiap tahap rantai makanan (Galasso *et al.*, 2025). Beberapa dampak dari jenis logam tertentu disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dampak ekologis beberapa logam berat

Jenis logam	Jalur utama	Dampak pada makhluk hidup
Merkuri (Hg)	Udara/Hujan	Gangguan saraf pada ikan, masalah reproduksi.
Timbal (Pb)	Aliran air di tanah	Gangguan pertumbuhan dan pembentukan sel darah.
Kadmium (Cd)	Limbah industri	Kerusakan insang ikan.

Pada udang yang dibudidayakan, logam berat banyak menumpuk di bagian usus dan organ pencernaannya, yang dapat memengaruhi kesehatan dan pertumbuhannya (Derrick *et al.*, 2025; Ra *et al.*, 2023). Meski paparan logam berat tidak selalu langsung mematikan, dalam jangka panjang dapat mengurangi jumlah spesies tertentu di suatu ekosistem (Ouma *et al.*, 2022).

Dinamika Fisikokimiawi dan Akumulasi pada Sedimen

Analisis dari literatur menegaskan bahwa sedimen berfungsi sebagai lokasi penumpukan utama (*sink*) bagi elemen logam berat pascatranspor di perairan (Macleod & Coughanowr, 2019). Karena karakteristik dasar

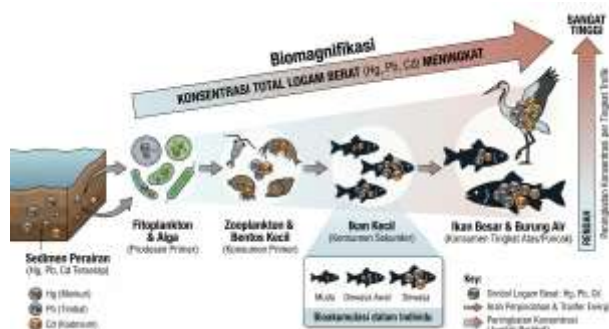
logam berat yang tidak mudah mengalami degradasi oleh mikroba secara alami, kompartemen ini cenderung mempertahankan polutan tersebut untuk jangka waktu yang lama (Tarfeen *et al.*, 2022).

Dinamika dan tingkat reaktivitas logam berat di dalam substrat sangat bergantung pada variabel fisikokimiawi perairan. Tingkat keasaman (pH) dan fraksi bahan organik memberikan pengaruh yang besar dalam menstimulasi mobilitas ion logam (Ali *et al.*, 2019). Lingkungan perairan dengan kondisi pH yang lebih rendah (asam) umumnya memfasilitasi proses pelarutan, yang menjadikan logam toksik seperti seng (Zn) dan kadmium (Cd) lebih rentan diserap oleh organisme perairan. Sebaliknya, substrat sedimen yang kaya akan material organik memiliki kemampuan membentuk ikatan ligan yang dapat mengimobilisasi toksikan tersebut (Bakshe & Jugade, 2021). Hal ini mengindikasikan bahwa evaluasi kualitas lingkungan perlu mempertimbangkan parameter kualitas air, bukan sekadar melihat konsentrasi logam secara absolut.

Pemetaan status kontaminasi secara kuantitatif sangat berguna untuk memahami kapasitas toleransi ekosistem. Evaluasi menggunakan indeks pengukuran seperti Faktor Kontaminasi (*Contamination Factor*) maupun Indeks Beban Polusi (*Pollution Load Index*) memberikan wawasan terkait variabilitas spasial pencemaran, seperti yang teramati di kawasan Teluk Youtefa, Papua (Hamuna & Wanimbo, 2021). Perairan yang berada relatif jauh dari tekanan antropogenik masif, misalnya sedimen di wilayah estuari Sungai Comal, cenderung mencatatkan nilai risiko ekologis yang sangat rendah (Haryati *et al.*, 2026).

Bioakumulasi dan Transfer Trofik

Konsistensi paparan logam berat dapat memicu dampak ekotoksikologis secara progresif. Terakumulasinya residu pada biota tingkat rendah berisiko memunculkan efek bioakumulasi serta pelipatgandaan racun di sepanjang rantai nutrisi (Hossain *et al.*, 2024), sebagaimana diilustrasikan secara konseptual pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema konseptual bioakumulasi dan biomagnifikasi logam berat dari sedimen menuju konsumen tingkat atas dalam ekosistem perairan (ilustrasi dibuat dengan teknologi Imagen dari Google)

Selain mengancam keseimbangan populasi akuatik, infiltrasi logam berat pada jaring makanan memunculkan risiko yang proporsional bagi populasi manusia (Ding *et al.*, 2022; Khushbu *et al.*, 2022). Konsumsi hidangan laut yang berasal dari area tercemar telah lama dikorelasikan oleh berbagai studi epidemiologi dengan gangguan organ dan disfungsi kognitif.

Implikasi Kesehatan Manusia dan Strategi Remediasi

Mempertimbangkan implikasi kompleks dari persistensi pencemaran ini, intervensi perbaikan kualitas air terus dikembangkan. Sejumlah literatur secara spesifik merekomendasikan pemanfaatan alternatif berbasis biologi (Joshi *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2024). Teknik bioremediasi memanfaatkan bakteri pendegradasi, sedangkan fitoremediasi menggunakan komunitas tanaman air untuk mendetoksifikasi lingkungan dari sisa logam berat. Pendekatan remediasi hijau (*green remediation*) ini dinilai jauh lebih bersahabat dengan lingkungan daripada pengerukan sedimen konvensional, meskipun efektivitas implementasinya masih sangat bergantung pada kondisi fisik dan hidrodinamika dari masing-masing area perairan (Sodhi *et al.*, 2022).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pencemaran logam berat di ekosistem perairan didorong oleh eskalasi laju kegiatan antropogenik berskala makro seperti industri dan pertanian, selain sebagian kecil masukan alami. Polutan persisten ini didistribusikan melalui jalur udara dan aliran limpasan

permukaan (*run-off*), yang pada akhirnya menjadikan sedimen perairan sebagai titik henti utamanya. Berbagai elemen toksik dapat masuk dan menumpuk pada jaringan organisme air, bergerak naik menembus tahapan jaring-jaring makanan, serta memengaruhi kelangsungan fisiologis fauna perairan. Proses biomagnifikasi ini turut menimbulkan potensi risiko asimilasi logam yang berdampak bagi kesehatan manusia. Penerapan manajemen pesisir yang terpadu, dipadukan dengan optimalisasi pendekatan remediasi biologis, disarankan sebagai langkah fundamental guna merestorasi dan menjaga kelayakan fungsi ekosistem perairan dalam jangka waktu yang panjang.

Saran

Berdasarkan simpulan dari tinjauan ini, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan. Pertama, pemantauan kualitas air dan sedimen secara berkala dipandang perlu untuk ditingkatkan, khususnya di kawasan muara sungai dan pesisir yang berdekatan dengan aktivitas antropogenik. Kedua, penguatan kebijakan dan penegakan regulasi terkait pengelolaan limbah sebelum dibuang ke badan air dapat menjadi instrumen mitigasi yang efektif. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk lebih mengeksplorasi efektivitas serta penerapan teknologi remediasi ramah lingkungan, seperti fitoremediasi dan bioremediasi, yang disesuaikan secara spesifik dengan karakteristik hidrodinamika perairan setempat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dr. Majariana Krisanti, S.Pi., M.Si., selaku dosen pengampu mata kuliah Manajemen dan Asesmen Eko-toksikologi (PSL2626) di Program Studi Doktorat Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana IPB University, atas arahan, bimbingan, serta evaluasi kritisnya selama proses penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifudin, A. F. M., Wulandari, A., & Irawanto, R. (2024). Pencemaran logam berat di air, sedimen, dan organisme pada beberapa sungai di Pulau Jawa, Indonesia: Tinjauan literatur. *Environmental Pollution Journal*, 4(1), 959–971. <https://doi.org/10.58954/epj.v4i1.183>

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Andriani, Y., Fitri, A. D. P., Arief, M. C. W., & Zahidah, Z. (2025). Lead pollution in the Angke Kapuk mangrove forest of the Jakarta Bay area. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(1), 13–20. <https://doi.org/10.15244/pjoes/185542>
- Bakshe, P., & Jugade, R. (2021). Distribution, association, and ecological risk evaluation of heavy metals and influencing factors in major industrial stream sediments of Chandrapur district, Central India. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(2), 78. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05040-3>
- Brady, J. P., Ayoko, G. A., Martens, W. N., & Goonetilleke, A. (2015). Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5), 306. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4563-x>
- Derrick, A., Yohana, M. A., Yudong, Z., Gongyu, L., Tan, B., & Zhang, S. (2025). Understanding the detrimental effects of heavy metal pollution in shrimp farming and treatment methods – a review. *Annals of Animal Science*, 25(1), 35–56. <https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0041>
- Diansyah, G., Hermansyah, Rohendi, D., & Ulqodry, T. Z. (2025). Risk assessment of heavy metal pollution in water, sediment, and fish from the Musi River Estuary, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(9), 1051. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14501-9>
- Ding, C., Chen, J., Zhu, F., Chai, L., Lin, Z., Zhang, K., & Shi, Y. (2022). Biological toxicity of heavy metal(loid)s in natural environments: From microbes to humans. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 920957. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.920957>
- El-Sharkawy, M., Alotaibi, M. O., Li, J., Du, D., & Mahmoud, E. (2025). Heavy metal pollution in coastal environments: Ecological implications and management strategies: A review. *Sustainability*, 17(2), 701. <https://doi.org/10.3390/su17020701>
- Galasso, F., Frank, A. B., & Foster, W. J. (2025). Heavy metal toxicity and its role as a major driver of past biodiversity crises. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 780. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02781-5>
- Gavas, S., Patil, A. J., & Gurav, M. (2026). Global research trends on heavy metal contamination in bivalve. *Regional Studies in Marine Science*, 96, 104886. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2026.104886>
- Hamuna, B., & Wanimbo, E. (2021). Heavy metal contamination in sediments and its potential ecological risks in Youtefa Bay, Papua Province, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(8), 209–222. <https://doi.org/10.12911/22998993/139116>
- Haryati, A., Ashari, D. N., Prihatiningsih, I., & Januar, H. I. (2026). Analisis pencemaran logam berat dan risiko ekologis di sedimen estuaria Sungai Comal. *Buletin Oseanografi Marina*, 15(1), 55–69. <https://doi.org/10.14710/buloma.v15i1.78550>
- Hossain, M. M., Jahan, I., Dar, M. A., Dhanavade, M. J., Mamta, A. F. Bin, Maxwell, S. J., Han, S., & Zhu, D. (2024). A review of potentially toxic elements in sediment, water, and aquatic species from the river ecosystems. *Toxics*, 13(1), 26. <https://doi.org/10.3390/toxics13010026>
- Joshi, S., Gangola, S., Bhandari, G., Bhandari, N. S., Nainwal, D., Rani, A., Malik, S., & Slama, P. (2023). Rhizospheric bacteria: The key to sustainable heavy metal detoxification strategies. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1229828. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229828>
- Khushbu, Gulati, R., Sushma, Kour, A., & Sharma, P. (2022). Ecological impact of heavy metals on aquatic environment with reference to fish and human health. *Journal of Applied and Natural Science*, 14(4), 1471–1484. <https://doi.org/10.31018/jans.v14i4.3900>
- Kumar, A., Dadhwal, M., Mukherjee, G., Srivastava, A., Gupta, S., & Ahuja, V. (2024). Phytoremediation: Sustainable approach for heavy metal pollution. *Scientifica*, 2024(1), 3909400. <https://doi.org/10.1155/2024/3909400>
- Macleod, C., & Coughanowr, C. (2019). Heavy metal pollution in the Derwent estuary: History, science and management. *Regional Studies in Marine Science*, 32,

100866.

<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100866>

Mehreen, A., & Liu, X. (2026). Heavy metal infiltration in coastal sediments: Bioaccumulation pathways and toxicological repercussions on *Perinereis aibuhitensis*. *Marine Pollution Bulletin*, 225, 119263.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119263>

Ouma, K., Shane, A., & Syampungani, S. (2022). Aquatic ecological risk of heavy-metal pollution associated with degraded mining landscapes of the southern Africa river basins: A review. *Minerals*, 12(2), 225.

<https://doi.org/10.3390/min12020225>

Palmer, J., & Herat, S. (2021). Ecotoxicity of microplastic pollutants to marine organisms: A systematic review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(5), 195.

<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05155-7>

Ra, W.-J., Yoo, H. J., Kim, Y.-H., Yun, T., Soh, B., Cho, S. Y., Joo, Y., & Lee, K.-W. (2023). Heavy metal concentration according to shrimp species and organ specificity: Monitoring and human risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 197, 115761.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115761>

Sodhi, K. K., Mishra, L. C., Singh, C. K., & Kumar, M. (2022). Perspective on the heavy metal pollution and recent remediation strategies. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100166.

<https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100166>

Tarfeen, N., Nisa, K. U., Hamid, B., Bashir, Z., Yattoo, A. M., Dar, M. A., Mohiddin, F. A., Amin, Z., Ahmad, R. A., & Sayyed, R. Z. (2022). Microbial remediation: A promising tool for reclamation of contaminated sites with special emphasis on heavy metal and pesticide pollution: A review. *Processes*, 10(7), 1358.

<https://doi.org/10.3390/pr10071358>

Zhang, Q., Liu, H., Li, X., & Liu, F. (2025). Process of heavy metal transport between soil and the atmosphere: A review. *PeerJ*, 13, e20381.

<https://doi.org/10.7717/peerj.20381>